

宽负荷下切圆燃煤锅炉 H₂S 分布特性的数值模拟

邓磊, 袁茂博, 杨家辉, 韩磊, 姜家豪, 车得福

(西安交通大学 动力工程多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 锅炉采用空气分级燃烧降低 NO_x 排放的同时也提高了主燃区 H₂S 体积分数。炉墙壁面过高的 H₂S 体积分数是加剧水冷壁高温腐蚀的重要因素。为保障新能源并网发电, 大型燃煤机组灵活调峰的需求增加, 不同负荷下的水冷壁近壁面 H₂S 分布特性值得关注。通过正交试验分析了切圆燃煤锅炉运行参数对水冷壁近壁面 H₂S 体积分数分布的影响。选取一台超临界 600 MW 切圆燃煤锅炉建立数值模型, 设计 L₁₆(4⁵) 正交工况, 覆盖 100% BMCR、75% THA, 50% THA 以及 35% BMCR 四种负荷。建立了自定义 SO_x 生成模型以确定燃料硫的析出和转化路径, 模型包含多表面反应子模型以描述焦炭与 O₂/CO₂/H₂O 等 3 种气体的异相反应, 并确定焦炭气化反应消耗量占总消耗量的比例, 进而对炉膛 H₂S 空间分布进行了模拟计算。研究表明, 近壁面高体积分数 H₂S 区域主要位于投运燃烧器层中最下层燃烧器以下以及最上层燃烧器以上至 SOFA 层之间, 烟气切圆沿炉膛高度增加逐渐增大是造成后一区域 H₂S 体积分数较高的主要原因。35% BMCR 负荷下水冷壁重点区域的 H₂S 平均体积分数为 364 μL/L, 明显低于其他负荷。锅炉运行参数对重点区域 H₂S 体积分数影响程度的排序为: 锅炉负荷 > 一次风率 > 主燃区空气过量系数 > 假想切圆直径 > 燃烧器竖直摆角。

关键词: 切圆燃煤锅炉; 宽负荷; H₂S 分布; 正交分析; 数值模拟

中图分类号: TK16 文献标志码: A 文章编号: 0253-9993(2024)06-2887-09

Numerical simulation on H₂S distribution characteristics of tangentially coal-fired boiler under wide loads

DENG Lei, YUAN Maobo, YANG Jiahui, HAN Lei, JIANG Jiahao, CHE Defu

(State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Air staged combustion reduces NO_x emissions, but increases the H₂S concentration in primary combustion zone. The excessive H₂S concentration near the furnace wall is an important factor that aggravates the high-temperature corrosion of the water-cooled wall. With large-scale renewable power integrated into the grid, the demand for flexible peak-shaving operation of traditional thermal power units has increased. The H₂S concentration distribution near the furnace wall under different boiler loads deserves attention. Hence, the influence of different operating parameters of tangentially coal-fired boiler on H₂S concentration distribution near the furnace wall was investigated by orthogonal test. A supercritical 600 MW tangentially coal-fired boiler was selected to establish a numerical model. The L₁₆(4⁵) orthogonal numerical conditions was designed to cover four boiler loads, including 100% BMCR, 75% THA, 50% THA and 35% BMCR. A user-defined SO_x generation model was employed to calculate the H₂S concentration distribution inside the furnace. The re-

收稿日期: 2023-02-24 修回日期: 2023-04-30 责任编辑: 王凡 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.0248

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2023YFB4102202)

作者简介: 邓磊 (1983—), 男, 湖北荆门人, 副教授, 博士生导师。E-mail: leideng@mail.xjtu.edu.cn

通讯作者: 车得福 (1962—), 男, 吉林德惠人, 教授, 博士生导师。E-mail: dfche@mail.xjtu.edu.cn

引用格式: 邓磊, 袁茂博, 杨家辉, 等. 宽负荷下切圆燃煤锅炉 H₂S 分布特性的数值模拟[J]. 煤炭学报, 2024, 49(6): 2887-2895.

DENG Lei, YUAN Maobo, YANG Jiahui, et al. Numerical simulation on H₂S distribution characteristics of tangentially coal-fired boiler under wide loads[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(6): 2887-2895.



移动阅读

lease of fuel sulfur and mutual transformation of sulfur components were considered. At the same time, the model included a multiple surface reaction model for describing the heterogeneous reaction between coke and $O_2/CO_2/H_2O$, and the ratio of the gasification rate to the consumption rate for char particle was calculated. The results show that the high H_2S concentration areas are mainly located below the bottom burner that on operation and between the top burner and SOFA nozzle. The main reason for the high H_2S concentration in the latter area is that the tangential circle of flue gas increases gradually along the furnace height. The orthogonal analysis indicates that the average H_2S concentration in the key area of the furnace wall under 35% BMCR load is $364 \mu\text{L/L}$, which is significantly lower than that under the other loads. In addition, the impact of operating parameters on the H_2S concentration in key areas follows the order of boiler load > primary air rate > excess air coefficient of main combustion zone > imaginary tangent circle diameter > vertical swing angle of burner.

Key words: tangentially coal-fired boiler; wide load; H_2S distribution; orthogonal analysis; numerical simulation

“富煤、贫油、少气”的资源禀赋决定了中国长期以煤为主的一次能源结构^[1]。对此中国也制定了全球最严格的火电机组排放标准^[2]，其中氮氧化物排放上限为 50 mg/m^3 。空气分级燃烧是降低氮氧化物排放的主要手段，但部分机组进行分级燃烧改造后锅炉水冷壁出现了严重的高温腐蚀^[3-5]。炉内分级燃烧的特点是在主燃区进行贫氧燃烧，形成还原性气氛并降低燃烧温度。煤燃烧过程硫元素通常以 H_2S 、 SO_2 、 COS 等形式释放到烟气中，而在还原性气氛下燃料硫倾向于转化为 H_2S ^[6-7]。当近壁面 H_2S 体积分数超过 $100 \mu\text{L/L}$ 时^[8]，就会引起水冷壁管高温腐蚀，进而威胁锅炉的安全运行。四角切圆燃煤锅炉水冷壁高温腐蚀主要出现在前墙和后墙上，位于顶层燃烧器与 SOFA 喷口之间^[9-10]，侧墙上的高温腐蚀通常不如前、后墙严重^[11]，这与水冷壁近壁面高 H_2S 体积分数的区域相一致。

然而，炉膛内的 H_2S 体积分数测点数量有限，无法对水冷壁进行全面监测。主燃区空气过量系数、一次风率、切圆直径等运行参数对 H_2S 体积分数分布的影响程度与效应并不明晰。同时，为保障新能源并网发电，大型燃煤机组灵活调峰的需求增加，不同负荷下的水冷壁近壁面 H_2S 分布特性值得关注。随着 CFD 技术的快速发展，炉膛的数值模拟可用于计算 H_2S 的体积分数分布^[12-13]。为准确描述硫的气相组分的相互转化，利兹大学提出了包含 100 多个基元反应的转化模型^[14]，涉及 H_2S 、 SO_2 、 COS 、 SH 等含硫组分。为提高计算效率，吕嗣晨^[15]提出了包含 15 个组分和 28 个基元反应的简化模型，并提高了低过量空气系数下模型的适用性。

张志等^[16-17]认为，在具有庞大网格数量的炉膛模型上求解复杂的基元反应效率不高，总包反应能够在满足工程计算精度的前提下，进一步提高计算速率。因此，他们参考基元反应模型，归纳了包含 H_2S 、 SO_2 和 COS 等 3 种含硫组分的 10 个总包反应。

参考张志等^[16-17]提出的总包反应模型，笔者^[18]在

前期工作中建立了一种适用于还原性气氛的 SO_x 生成模型，包含燃料硫释放以及含硫组分的相互转化过程。模型通过调用炉膛 CFD 计算得到的流速场、温度场和组分场，可实现 H_2S 体积分数分布预测。笔者选取一台 600 MW 四角切圆燃煤锅炉建立炉膛数值模型并设计正交工况，覆盖 100% BMCR、75% THA、50% THA 以及 35% BMCR 四种负荷，涉及一次风率、主燃区空气过量系数、切圆直径、燃烧器摆角等运行参数。正交试验设计^[19]的优势在于用最少的工况全面考查锅炉各运行参数对炉膛 H_2S 体积分数分布的影响，并可对计算结果进行直观分析和方差分析。通过分析锅炉运行参数对壁面 H_2S 体积分数分布的影响机制，可为水冷壁高温腐蚀防治工作提供参考。

1 数值计算模型

1.1 研究对象

研究对象为一台超临界 600 MW 四角切圆燃煤锅炉，由于锅炉实际结构复杂，对锅炉主体进行了如图 1 所示的简化。

锅炉高 63 750 mm，炉膛截面深度和宽度分别为 17 696 和 18 816 mm，炉膛上部布置有分隔屏、后屏、末级再热器和末级过热器，皆简化为无厚度壁面。燃烧器系统采用低 NO_x 同轴燃烧系统 (LNCFS)，布置于炉膛四角，包含 6 层煤粉喷嘴 (PA-A/F)、火下风 (UFA)、2 层紧凑燃尽风 (CCOFA)、预置水平偏角的辅助风喷嘴 (CFS) 和 5 层分离燃尽风 (SOFA)。其中，CFS 喷嘴设置了顺时针方向 20° 的水平偏转角度，构成与主气流同向的更大直径切圆。

1.2 数值模型与网格划分

参照锅炉布置简图，采用 ANASY ICEM 软件建立炉膛的三维模型，随后导入 ANASY FLUENT 软件设置边界条件并选取计算模型，对炉膛内的传热传质过程进行三维稳态计算。流场选取 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型进行求解^[20]。辐射传热采用离散坐标辐射模

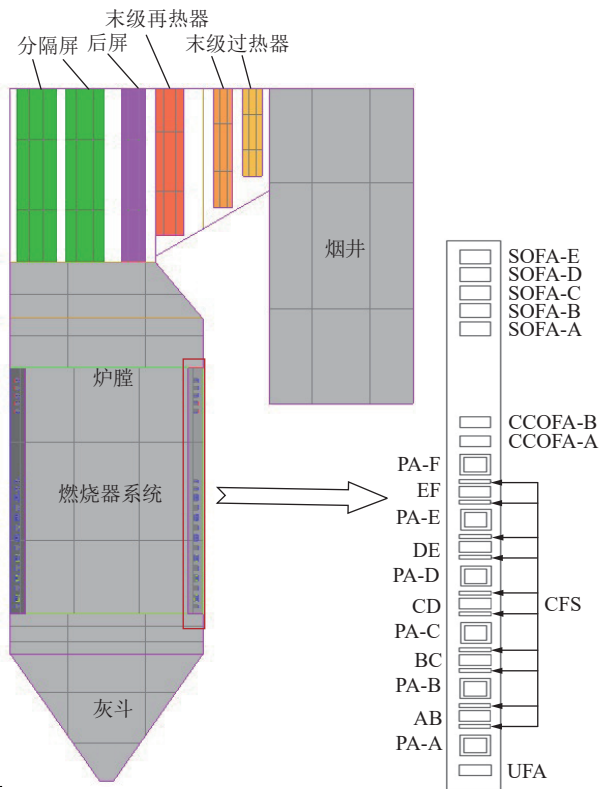


图 1 锅炉布置
Fig.1 Diagram of boiler

型进行计算, 气相的辐射吸收系数由灰色气体加权求和模型定义。煤粉颗粒的运动轨迹采用基于欧拉-拉格朗日方法的随机轨道模型进行定义^[21], 粒径为 Rosin-Rammler 分布, 最小粒径 1 μm, 最大粒径 100 μm, 平均粒径 61 μm。采用多表面反应模型定义煤焦与 O₂/CO₂/H₂O 等 3 种气体的异相反应^[22], 动力学参数见表 1。煤样的元素分析和工业分析见表 2。

表 1 焦炭气固化学反应^[23]

Table 1 Heterogeneous reactions of coke^[23]

化学反应	指前因子/ (g · (m ⁻² · s ⁻¹ · Pa) ⁻¹)	活化能/(kJ · mol ⁻¹)
C (s) + 0.5O ₂ = CO	5.00	74
C (s) + CO ₂ = 2CO	6.35	162
C (s) + H ₂ O = CO + H ₂	1.92	147

由于锅炉模型结构规整, 故采用六面体结构化网格获得更高的计算效率。计算域为冷灰斗底部至锅炉后烟井之间区域, 对主燃区和燃烧器喷口附近的网格进行加密处理, 保证计算精度的同时避免造成整体网格数过大。网格无关性测试如图 2 所示, 207 万网格与 248 万网格的计算结果十分接近, 最终确定炉膛模型的网格数量为 207 万。

表 2 煤质分析

Table 2 Analysis on coal properties

工业分析/%				元素分析/%					Q _{net,ar} / (MJ · kg ⁻¹)
FC _{ar}	V _{daf}	A _{ar}	M _{ar}	C _{ar}	H _{ar}	O _{ar}	N _{ar}	S _{ar}	
50.38	35.00	8.00	14.50	62.83	3.62	9.94	0.70	0.41	22.76

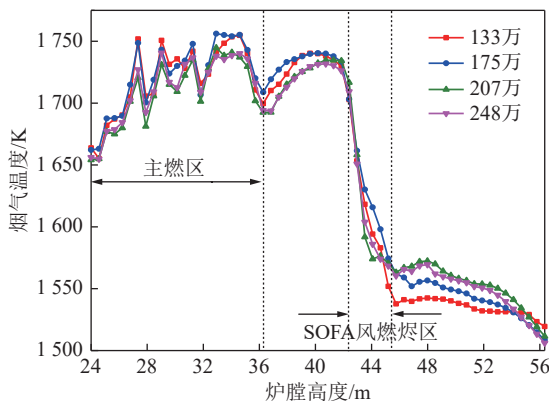


图 2 网格无关性测试
Fig.2 Grid independence test

100% BMCR 负荷下模拟结果与实炉测量数据的对比见表 3。水冷壁吸热量和后屏出口烟温的相对偏差分别为 7.50% 和 4.79%。A 层燃烧器 (标高 25 m)、C 层燃烧器 (标高 29 m) 和 F 层燃烧器 (标高 35 m) 高

表 3 100% BMCR 负荷下模拟结果与实测数据对比

Table 3 Comparison between simulation results and measured data under 100% BMCR load

项目	水冷壁吸 热量/MW	后屏出口 烟温/K	前端中心 H ₂ S 体积分数/(μL · L ⁻¹)		
			25 m	29 m	35 m
模拟值	659	1291	321	145	186
实测值	610	1356	348	134	203
偏差/%	7.50	4.79	7.76	8.21	8.37

度上的 H₂S 体积分数相对偏差分别为 7.76%、8.21% 和 8.37%。模拟结果与实测数据吻合度较高, 能够满足工程应用的精度要求。

1.3 SO_x 生成模型

炉膛流场、组分场和温度场计算收敛后, 加载 UDF 自定义 SO_x 生成模型, 计算炉膛 H₂S 体积分数分布。图 3 为 SO_x 生成模型的示意图, 包含燃料硫的释

放和含硫组分相互转化。模型主体以“DEFINE_SO_x_RATE”宏编写,替换 FLUENT 软件自带的 SO_x 生成模型,对 H₂S、COS 和 SO₂ 的体积分数分布进行计算。

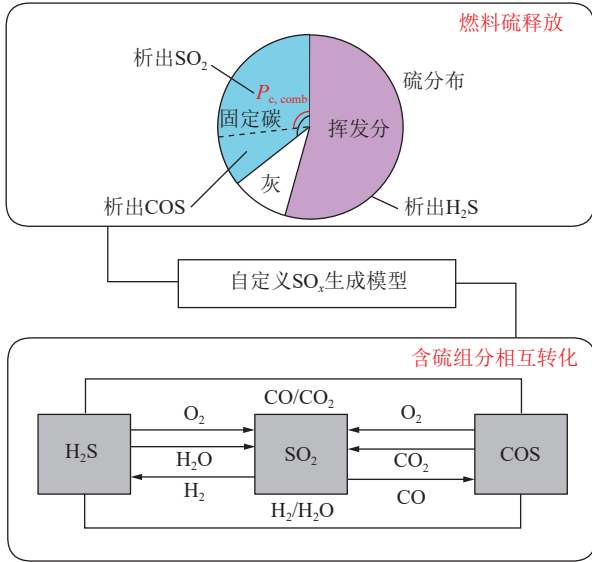


图 3 SO_x 生成模型示意

Fig.3 Schematic diagram of the SO_x generation model

如图 3 所示,煤中的硫元素以一定比例分布在挥发分、固定碳和灰分中,模型假设挥发分硫以 H₂S 的形式析出,焦炭硫在焦炭氧化和气化反应中分别以 SO₂ 和 COS 的形式析出。H₂S、SO₂ 以及 COS 的析出速率由式 (1)~(3) 表示:

$$S(\text{H}_2\text{S}) = \frac{\alpha W_{\text{ar(s)}}}{W_{\text{ar(r)}}} \frac{1\,000 r_{\text{vol}}}{M_{\text{w,S}} V_{\text{cell}}} \quad (1)$$

$$S(\text{SO}_2) = \frac{(1 - \alpha - \gamma) W_{\text{ar(s)}}}{W_{\text{ar(FC)}}} \frac{1\,000 r_{\text{c}} P_{\text{c,comb}}}{M_{\text{w,S}} V_{\text{cell}}} \quad (2)$$

$$S(\text{COS}) = \frac{(1 - \alpha - \gamma) W_{\text{ar(s)}}}{W_{\text{ar(FC)}}} \frac{1\,000 r_{\text{c}} (1 - P_{\text{c,comb}})}{M_{\text{w,S}} V_{\text{cell}}} \quad (3)$$

式中, α 和 γ 分别为硫在挥发分和灰分中的质量分数,通过实验测定取值分别为 0.55 和 0.1; $W_{\text{ar(s)}}$ 和 $W_{\text{ar(FC)}}$ 分别为收到基煤中硫含量和固定碳,%; $W_{\text{ar(v)}}$ 为收到基挥发分,%; r_{vol} 和 r_{c} 分别为挥发分的挥发速率和焦炭的燃烧速率, kg/s; $M_{\text{w,S}}$ 为硫的摩尔质量, 0.032 kg/mol; V_{cell} 为网格单元体积, m³; $P_{\text{c,comb}}$ 为焦炭氧化反应速率占焦炭总反应速率的比例,详细计算方法参见文献[18]。

表 1 中 10 个总包反应的反应速率依次为 r_1, r_2, \dots, r_{10} , H₂S、SO₂ 以及 COS 的生成 (r_f) 与消耗 (r_r) 速率可由式 (4)~(9) 表示。生成速率与消耗速率的差值,即为 H₂S、SO₂ 以及 COS 的最终反应速率。

$$r_f(\text{H}_2\text{S}) = S(\text{H}_2\text{S}) + r_4 + r_5 + r_9 \quad (4)$$

$$r_r(\text{H}_2\text{S}) = r_1 + r_3 + r_6 + r_{10} \quad (5)$$

$$r_f(\text{SO}_2) = S(\text{SO}_2) + r_1 + r_2 + r_6 + r_8 \quad (6)$$

$$r_r(\text{SO}_2) = r_5 + r_7 \quad (7)$$

$$r_f(\text{COS}) = S(\text{COS}) + r_3 + r_7 + r_{10} \quad (8)$$

$$r_r(\text{COS}) = r_2 + r_4 + r_8 + r_9 \quad (9)$$

2 正交工况设计

锅炉数值模拟变量数目众多、设置灵活,因此需选择相对独立且对 H₂S 体积分数分布影响显著的变量进行正交分析。由于锅炉灵活调峰需求增加,选择锅炉负荷作为影响因素。给煤量、投运燃烧器层数以及过量空气系数与锅炉负荷关联密切,故在给定负荷下均保持一致,具体参数设置见表 4。

表 4 不同负荷下锅炉运行参数

Table 4 Operation parameters under different loads

负荷	给煤量/(t · h ⁻¹)	燃烧器层数	过量空气系数
100% BMCR	240.0	A~E	1.20
75% THA	164.4	B~E	1.33
50% THA	113.0	A~C	1.37
35% BMCR	95.7	B~C	1.47

此外,主燃区空气过量系数决定了空气分级程度,对还原性气氛和燃烧强度影响很大。一次风率对燃烧器喷口与煤粉着火位置的距离影响显著。燃烧器竖直摆角直接影响火焰的中心高度,进而影响各烟气组分在炉膛内的分布。假想切圆大小能够影响炉膛中火焰的充满度,过大易导致火焰刷墙,过小易导致燃烧稳定性变差,假想切圆直径 d 的推荐值如式 (10) 所示^[24]。在数值计算中,可同步调整煤粉射流与一、二次风的方向向量模拟燃烧器的竖直摆动并控制假想圆直径。这 4 项因素与锅炉负荷关联性弱且相对独立,故可与锅炉负荷一同设为正交试验的影响因素。

$$d = (0.05 \sim 0.12) \frac{a+b}{2} \quad (10)$$

式中, a 和 b 分别为炉膛截面的宽度和深度。

对上述 5 个影响因素设置 4 个水平,数值模拟正交工况见表 5, 100% BMCR、75% THA、50% THA 和 35% BMCR 分别代表满负荷、中负荷、低负荷、极低负荷的情况,对应锅炉宽负荷运行的需求,其余因素的 4 个水平基本覆盖了锅炉运行过程的参数调节范围。

表 5 数值模拟正交工况
Table 5 Orthogonal condition table

工况	影响因素				
	锅炉负荷	一次风率	主燃区过量空气系数	燃烧器摆角/(°)	假想切圆直径/m
1	100% BMCR	0.18	0.85	-10	2.0
2		0.20	0.90	0	1.0
3		0.22	0.95	10	1.5
4		0.24	1.00	20	2.5
5	75% THA	0.18	0.90	10	2.5
6		0.20	0.85	20	1.5
7		0.22	1.00	-10	1.0
8		0.24	0.95	0	2.0
9	50% THA	0.18	0.95	20	1.0
10		0.20	1.00	10	2.0
11		0.22	0.85	0	2.5
12		0.24	0.90	-10	1.5
13	35% BMCR	0.18	1.00	0	1.5
14		0.20	0.95	-10	2.5
15		0.22	0.90	20	2.0
16		0.24	0.85	10	1.0

3 计算结果分析

3.1 炉膛流场分析

炉内烟气流速分布能够直观地反映煤粉在炉内

的流动特性,而煤粉流动过程也伴随着燃料硫的释放。因此,烟气流动特性能够在一定程度上反映 H₂S 的分布特性。一、二次风射流进入炉膛后,沿射流方向的气流刚性逐渐减弱,四角的射流在喷射一段距离后即受到邻角气流的影响,从而改变行进方向,最终在炉膛中心区域形成充满度较好的切圆。切圆中心和壁面附近的烟气速度较低,因此一次风的向火侧和背根部均有烟气回流,利于煤粉颗粒着火燃烧。随着炉膛高度增加,煤粉颗粒在离心力的作用下使切圆直径逐渐大。

图 4 为不同负荷下的炉膛纵截面和横截面的烟气流速分布云图,依次对应于表 5 中的工况 1、工况 8、工况 10 和工况 15,各工况的假想切圆直径相等。从图 4 可以看出,锅炉纵截面流速分布基本都是沿中心线对称的,这与锅炉的对称结构相吻合。同时,在炉膛不同高度横截面的速度云图上可观察到切圆的形成。SOFA 风由于风速高,形成的切圆直径相比于主燃区的切圆直径更小,从而对烟气产生更强的扰动,保证煤粉和可燃气体的燃烬。随着炉膛高度的增加,主气流量增大且温度升高,沿炉膛向上的流速更快,这使得主燃区切圆直径随着高度的增加而增大。

总体看来,随着锅炉负荷的降低,炉膛内的切圆直径减小。这是由于负荷降低时总风量降低,炉膛内的主气流流速降低,一、二次风在离开喷口后向炉膛

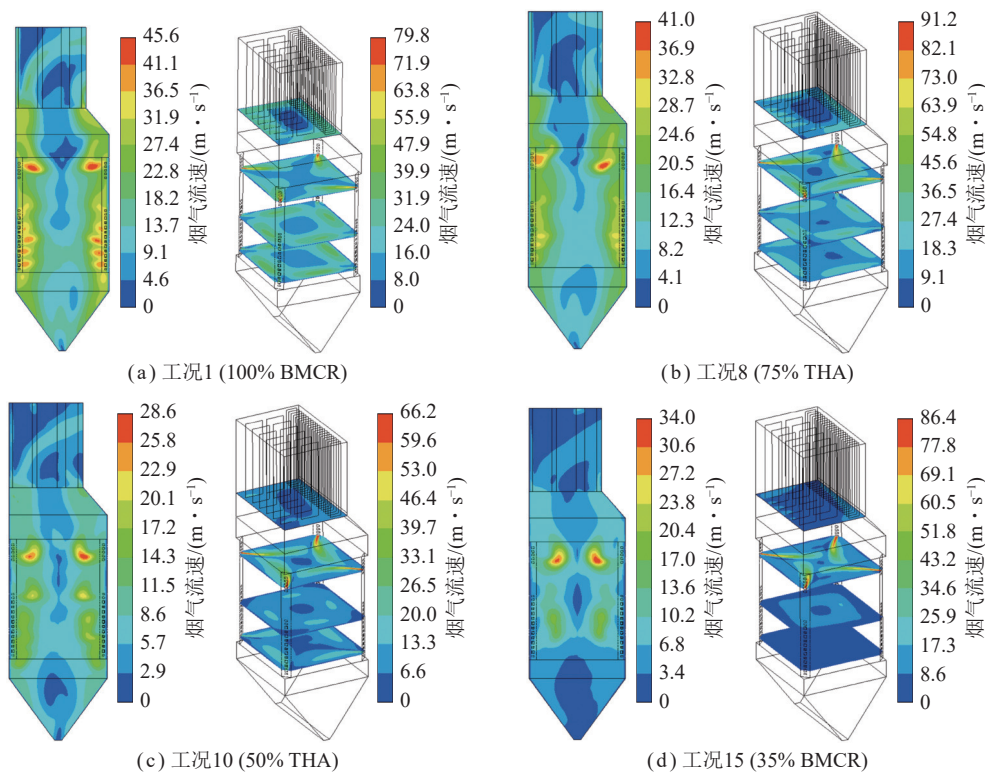


图 4 炉膛截面烟气流速分布云图

Fig.4 Velocity distribution of flue gas in furnace section

中心喷射距离更远,因此能够形成更小的切圆直径。当切圆直径过小时,炉内气流充满程度差,炉膛中部火焰较为集中,而炉墙温度水平较低,不利于煤粉的着火;而当切圆直径过大时,煤粉从燃烧器喷出后容易直接冲刷炉壁,导致水冷壁壁面出现局部高温和强还原性气氛,一旦发生炉壁结渣和高温腐蚀,就容易危及锅炉的安全运行。

3.2 不同负荷下 H₂S 的分布特性

图 5 展示了不同负荷稳态燃烧过程炉膛截面以及壁面的 H₂S 体积分数分布云图,依次对应于表 5 中的工况 1、工况 8、工况 10 和工况 15。从截面分布云图来看,H₂S 体积分数在炉膛下部较高,但在超过 SOFA 喷口高度之后迅速降低。高体积分数 H₂S 区域与水冷壁壁面存在一定距离,并随着锅炉负荷降低距离增大。

H₂S 主要来源于挥发分硫的转化以及 COS 和

SO₂ 的还原。分级燃烧下的炉膛烟气中 CO 体积分数较高,整体的还原性更强,因此 H₂S 缺乏被氧化的条件,且 COS 和 SO₂ 易被还原为 H₂S,这就导致炉膛下部的 H₂S 体积分数较高。图 6 为不同负荷下炉膛截面的 CO 体积分数分布云图。燃烧器区域和 SOFA 喷口之间,在旋流气体的扰动下,各组分强烈扩散,壁面附近的 CO 体积分数也随之升高。直至 SOFA 风喷入炉膛,炉膛内的 CO 气体快速燃烧,上炉膛中 CO 体积分数基本降为 0。随着负荷的降低,炉膛截面高 CO 体积分数区域有所减小,这是由于主燃区形成的火焰切圆会随着负荷降低而减小,煤粉的挥发和燃烬与水冷壁壁面的距离更远,形成的火焰更为集中,因此高体积分数 H₂S 区域相应地离壁面更远。

从水冷壁壁面附近的 H₂S 体积分数分布来看(图 5),在 100% BMCR 和 75% THA 负荷下,高体积分数 H₂S 区域主要位于 A 层燃烧器以下和 F 层燃烧器与

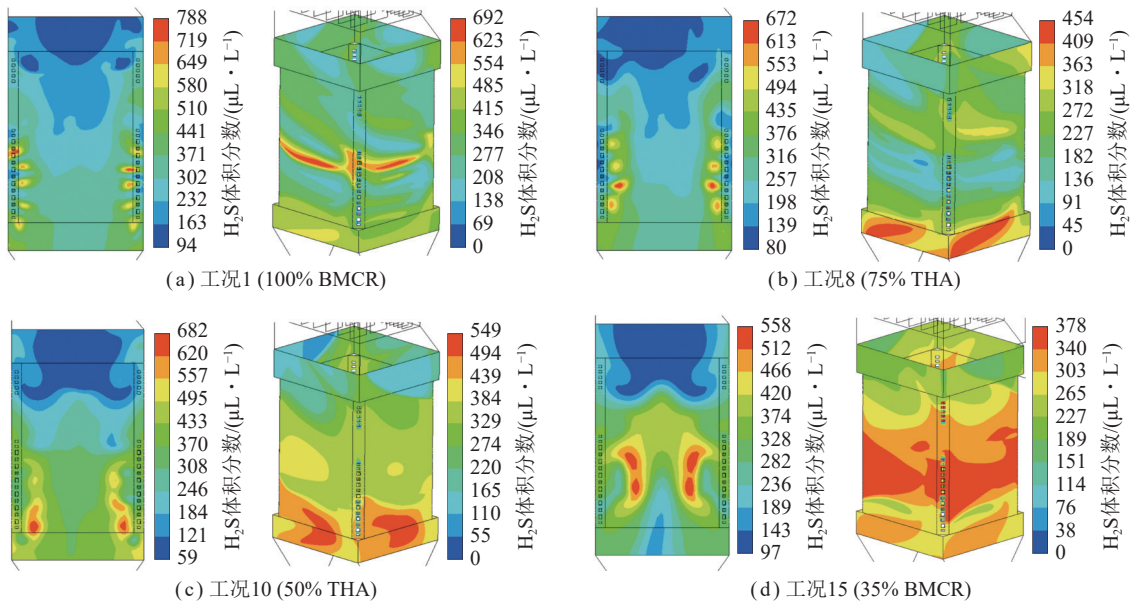


图 5 不同负荷炉膛截面以及壁面的 H₂S 体积分数分布云图

Fig.5 H₂S concentration distributions on furnace section and wall under different boiler loads

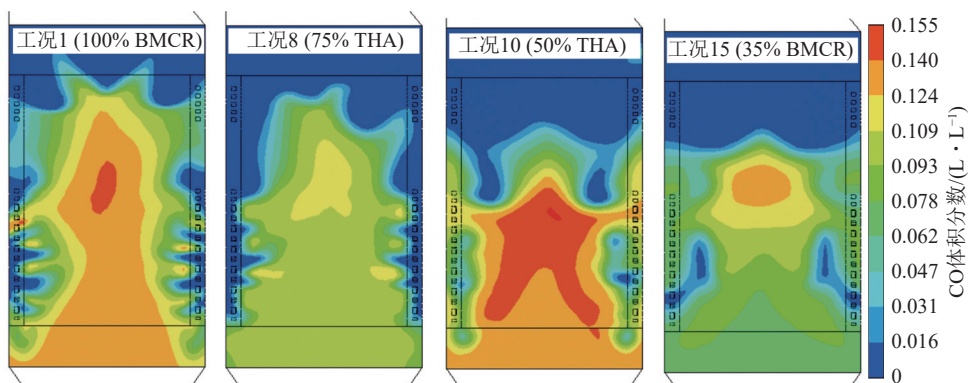


图 6 不同负荷炉膛截面 CO 体积分数分布云图

Fig.6 CO concentration distributions on furnace section under different boiler loads

SOFA 喷嘴之间。在 50% THA 负荷下, 高体积分数 H₂S 区域集中在 B 层燃烧器以下。下层燃烧器区域还原性气氛强, 导致整体 H₂S 体积分数较高。而 F 层燃烧器以上区域切圆直径增大且缺乏预偏置二次风的保护, 水冷壁同样容易出现高 H₂S 体积分数。这与 XIONG 等^[5]和 SUN 等^[10]观测到的严重高温腐蚀区域相吻合。在 35% BMCR 负荷下, 高体积分数 H₂S 区域在 C 层燃烧器和 F 层燃烧器之间, 且壁面附近的最大 H₂S 体积分数降低明显。这主要是由于 35% BMCR 负荷下燃烧器仅投运了 B 和 C 两层, C 层燃烧器至 CCOFA 风之间区域还原性气氛强, 导致 H₂S 大量生成并扩散到壁面。

由 H₂S 体积分数分布云图(图 5) 可知, 100% BMCR、75% THA、50% THA 和 35% BMCR 负荷下壁面附近 H₂S 体积分数最大值分别为 692、454、549 和 378 μL/L。不同负荷下锅炉的运行参数不尽相同, 各个锅炉运行参数对 H₂S 体积分数分布的影响将在下一节进行讨论。

3.3 重点区域 H₂S 浓度均值的正交分析

切圆燃烧通常会设置水平偏置二次风提高水冷壁附近的氧体积分数, 对主燃区水冷壁进行保护。然而炉膛内流场复杂, 偏置二次风也难以对水冷壁形成全面防护, 如图 5 所示, 主燃区水冷壁仍有部分区域 H₂S 体积分数过高。减少高 H₂S 体积分数区域, 降低 H₂S 体积分数峰值是减轻水冷壁高温腐蚀的关键所在。以“抓少数关键”为原则, 图 7 分别绘制了不同负荷下主燃区水冷壁前墙 H₂S 体积分数前 5%、10% 和 20% 的区域。其中前 5% 的区域太小, 普适性较差, 前 20% 的区域过泛, 针对性较弱。因此选择前 10% 的区域作为高 H₂S 体积分数的重点区域。

进一步, 将主燃区水冷壁所有网格单元上的 H₂S 体积分数由高到低进行排序, 对前 10% 的网格单元 H₂S 体积分数求取均值 $\bar{c}_{10\%}$, 作为重点区域 H₂S 体积分数的评价指标, 其计算方法为

$$\bar{c}_{10\%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n c_i \quad (11)$$

式中, n 为网格单元总数; c_i 为 H₂S 体积分数在前 10% 的 H₂S 体积分数 (即重点区域的 H₂S 体积分数), μL/L。

以重点区域的 H₂S 体积分数均值为评价指标, 能够精准地反映水冷壁重点区域的高温腐蚀状态, 进而为保障水冷壁安全提供参考。表 6 列举了正交试验工况与相应的高 H₂S 体积分数区 H₂S 体积分数均值结果。

重点区域 H₂S 体积分数均值的直观分析与极差

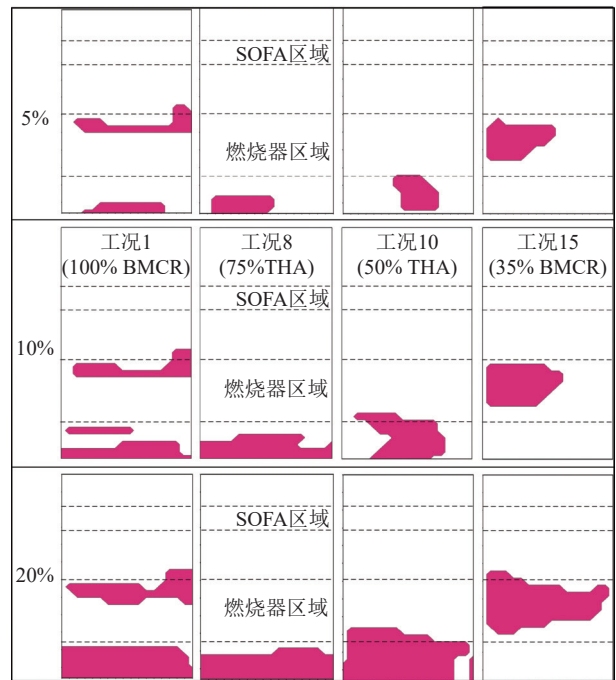


图 7 不同负荷下水冷壁前墙的重点区域示意

Fig.7 Schematic diagram of key areas on the front wall of the water-cooled wall under different loads

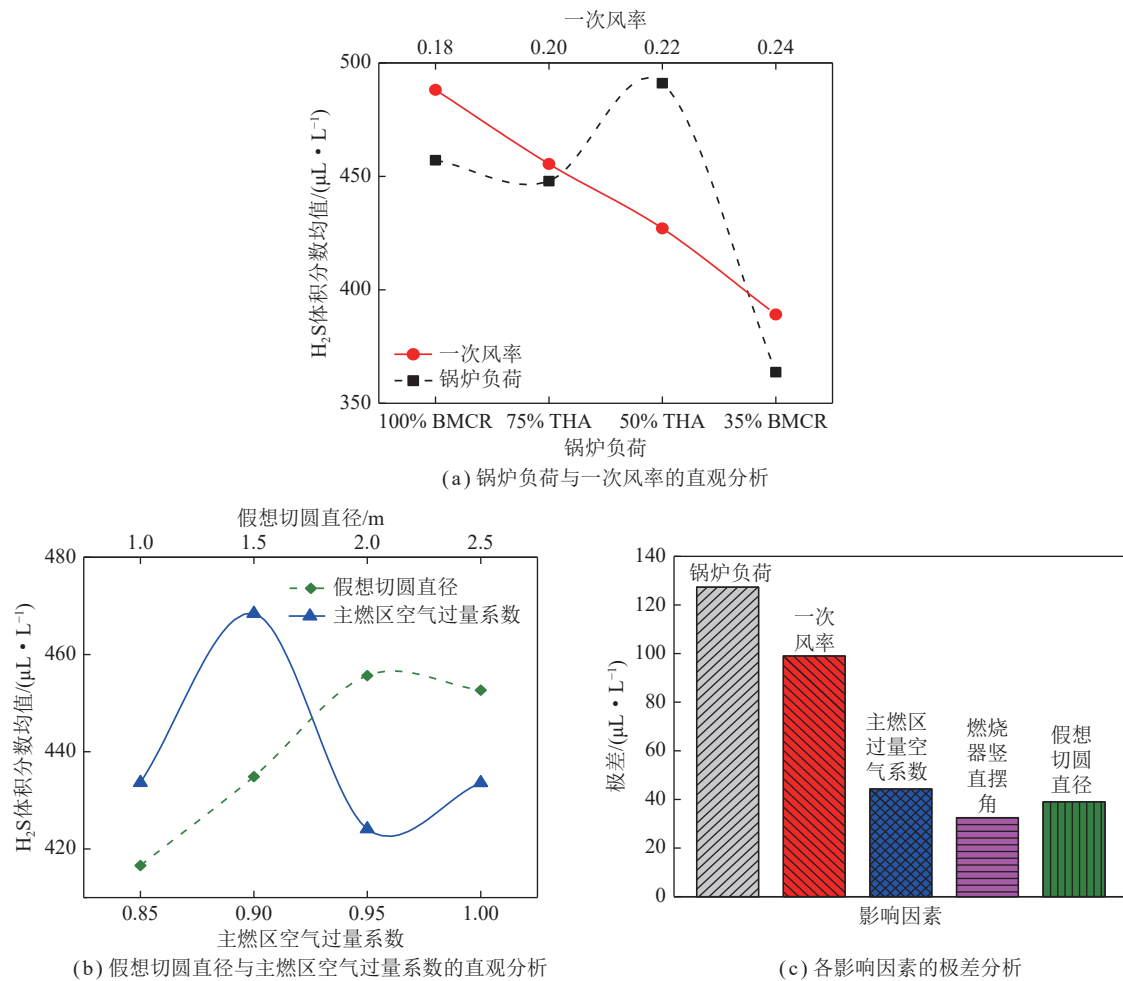
表 6 重点区域 H₂S 体积分数均值的正交试验结果

Table 6 Orthogonal test results of mean H₂S concentration in key areas of furnace wall μL/L

工况	1	2	3	4	5	6	7	8
结果	492	494	446	397	539	457	403	393
工况	9	10	11	12	13	14	15	16
结果	484	497	501	482	438	374	358	285

分析如图 8 所示。图 8 (a) 显示, 重点区域 H₂S 体积分数均值在 100% BMCR 与 75% THA 负荷下约为 450 μL/L, 在 50% THA 负荷下略微升高至 491 μL/L, 在 35% BMCR 负荷下大幅下降至 364 μL/L。这表明低负荷下水冷壁重点区域的 H₂S 体积分数均值水平更低。重点区域 H₂S 体积分数均值水平随着一、二次风比率的增加而降低。这是由于提高一次风比率后, 其流速和流量都会提高, 同时由于一次风温较低, 其升温时间也会更长。综合来看, 提高一次风率会使煤粉的着火燃烧位置与燃烧器的距离增加, 一定程度上降低了壁面附近的 H₂S 体积分数。

如图 8 (b) 所示, 重点区域 H₂S 体积分数均值在主燃区空气过量系数为 0.9 时最高, 为 468 μL/L。当主燃区过量空气系数较高时, 炉内的还原性气氛弱且主燃区气流量大, H₂S 生成量减少的同时还会被烟气稀释, 进而使得水冷壁近壁面出现较低体积分数的 H₂S。而主燃区过量空气系数较低时, 炉内还原性气

图 8 重点区域 H₂S 体积分数均值的直观分析与极差分析Fig.8 Visual analysis and range analysis of H₂S concentration in key areas of furnace wall

氛强且燃烧温度低,煤粉的着火燃烧与燃烧器的距离增加,壁面附近的 H₂S 体积分数反而有所降低。可见重点区域的 H₂S 体积分数均值在主燃区空气过量系数为 0.9 时出现峰值并非偶然。假想切圆直径由 1.0 m 增加至 2.0 m 后,重点区域的 H₂S 体积分数均值从 417 $\mu\text{L}/\text{L}$ 增加至 456 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。当假想切圆直径继续增加时,重点区域的 H₂S 体积分数均值几乎保持不变。切圆大小能够直接影响火焰与四墙的距离,进而影响到近壁面附近烟气的流速场与组分场。减小切圆直径在一定程度上能够降低水冷壁近壁面 H₂S 体积分数。

图 8 (c) 为各因素的极差分析结果,极差计算方法为同一因素的不同水平均值中最大值与最小值的差。根据极差的大小可确定各个因素对重点区域 H₂S 体积分数影响程度的排序,即锅炉负荷 > 一次风率 > 主燃区空气过量系数 > 假想切圆直径 > 燃烧器竖直摆角。其中,锅炉负荷和一次风率对应的极差分别为 127 和 99 $\mu\text{L}/\text{L}$,远高于其他因素,因此锅炉负荷和一次风率相比于另外 3 项运行参数对重点区域 H₂S 体积分数的影响更为显著。

4 结 论

(1) 不同负荷下水冷壁近壁面高体积分数 H₂S 区域主要集中于投运燃烧器中最下层燃烧器以下和最上层燃烧器至 SOFA 层之间区域。烟气切圆沿炉膛高度增加而增大是造成后一区域 H₂S 体积分数较高的原因。

(2) 正交分析显示,35% BMCR 负荷下水冷壁重点区域的 H₂S 平均体积分数为 364 $\mu\text{L}/\text{L}$,明显低于其他负荷。重点区域 H₂S 体积分数与一次风率基本呈负相关,而主燃区空气过量系数由 0.85 增至 1.00,重点区域 H₂S 体积分数呈现出先增后减的规律。

(3) 锅炉运行参数对重点区域 H₂S 体积分数影响程度的排序为:锅炉负荷 > 一次风率 > 主燃区空气过量系数 > 假想切圆直径 > 燃烧器竖直摆角。其中,锅炉负荷和一次风率对应的极差分别为 127 和 99 $\mu\text{L}/\text{L}$,远高于另外 3 项运行参数。

(4) 借助锅炉运行参数对炉膛内 H₂S 体积分数的影响幅度与效应,可指导不同负荷下运行参数的调节

方向,为减轻锅炉调峰运行下水冷壁的高温腐蚀提供参考。

参考文献(References):

- [1] 薛香玉,王长安,邓磊,等.基于全生命周期的富油煤原位热解碳排放研究[J].煤炭学报,2023,48(4):1773-1781.
XUE Xiangyu, WANG Chang'an, DENG Lei, et al. Study on carbon emissions from in-situ pyrolysis of tar-rich coal based on full life cycle analysis method[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(4): 1773-1781.
- [2] 彭志敏,贺拴玲,周佩丽,等.基于 TDLAS 的煤粉锅炉水冷壁近壁面 CO/H₂S 同步在线监测[J].热力发电,2022,51(10):145-152.
PENG Zhimin, HE Shuanling, ZHOU Peili, et al. TDLAS-based synchronous on-line measurement of CO/H₂S near water wall of a pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(10): 145-152.
- [3] 裴建军,张纬,由长福.墙式风射流改善煤粉炉低负荷高温腐蚀和结渣[J].中国电机工程学报,2021,41(19):6521-6529.
PEI Jianjun, ZHANG Wei, YOU Changfu. High temperature corrosion and slagging of pulverized coal-fired boiler at low load improved by wall air injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(19): 6521-6529.
- [4] 王毅斌,张思聪,谭厚章,等.劣质烟煤低氮燃烧模式下水冷壁高温腐蚀与硫化物沉积形成分析[J].中国电机工程学报,2020,40(24):8058-8066,8242.
WANG Yibin, ZHANG Sicong, TAN Houzhang, et al. Analysis of high-temperature corrosion and sulfide deposits formed on water-wall tubes under low-NO_x combustion mode for low-qualities bituminous coal[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 8058-8066,8242.
- [5] XIONG X, LIU X, TAN H, et al. Investigation on high temperature corrosion of water-cooled wall tubes at a 300 MW boiler[J]. Journal of the Energy Institute, 2020, 93(1): 377-386.
- [6] SHIRAI H, IKEDA M, ARAMAKI H. Characteristics of hydrogen sulfide formation in pulverized coal combustion[J]. Fuel, 2013, 114: 114-119.
- [7] GARCIALABIANO F, HAMPARTSOUMIAN E, WILLIAMS A. Determination of sulfur release and its kinetics in rapid pyrolysis of coal[J]. Fuel, 1995, 74(7): 1072-1079.
- [8] KUNG S C. Further understanding of furnace wall corrosion in coal-fired boilers[J]. Corrosion, 2013, 70(7): 749-763.
- [9] 熊小鹤,吕钊敏,阮仁晖,等.某切圆燃烧锅炉水冷壁高温腐蚀现象及其与 H₂S 含量的关系研究[J].广东电力,2022,35(7):107-113.
XIONG Xiaohu, LÜ Zhaomin, RUAN Renhui, et al. Water wall high-temperature corrosion of tangentially fired boiler and the correlation with hydrogen sulfide concentration[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(7): 107-113.
- [10] SUN X, NING Y, YANG J, et al. Study on high temperature corrosion mechanism of water wall tubes of 350 MW supercritical unit[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 121: 105131.
- [11] 邹磊,岳峻峰,张恩先,等.超超临界锅炉水冷壁管材高温腐蚀特性研究[J].中国电机工程学报,2018,38(21):6353-6359,6497.
ZOU Lei, YUE Junfeng, ZHANG Enxian, et al. Study on characteristics of high temperature corrosion for water wall tube material in ultra supercritical boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6353-6359,6497.
- [12] LIU H P, GUO X, CHEN L, et al. Numerical simulation of high-temperature corrosion and NO_x generation characteristics of a boiler[J]. Energy Sources Part a-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2021. DOI: 10.1080/15567036.2021.1931566
- [13] LIU H, ZHANG L, LI Q, et al. Effect of FGR position on the characteristics of combustion, emission and flue gas temperature deviation in a 1000 MW tower-type double-reheat boiler with deep-air-staging[J]. Fuel, 2019, 246: 285-294.
- [14] Leeds University. Sulphur mechanism extension to the Leeds Methane Mechanism[EB/OL]. 2002. <http://www.chem.leeds.ac.uk/com-bustion/mechanisms/leedssox52.dat>.
- [15] 吕嗣晨.还原性气氛下 H₂S 的生成机理研究[D].太原:太原理工大学,2021.
LÜ Sichen. Study on formation mechanism of H₂S in reducing atmosphere[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [16] 张志,陈登高,李振山,等.煤粉燃烧 H₂S 预测模型在对冲燃烧锅炉的 CFD 应用[J].中国电机工程学报,2018,38(13):3865-3872,4027.
ZHANG Zhi, CHEN Denggao, LI Zhenshan, et al. CFD application of a novel H₂S prediction model in an opposed-fired boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3865-3872,4027.
- [17] LI Z S, CHEN H, ZHANG Z. Experimental and modeling study of H₂S formation and evolution in air staged combustion of pulverized coal[J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2021, 38(4): 5363-5371.
- [18] YUAN M, DENG L, LIU H, et al. Numerical investigation on H₂S formation characteristics in air-staging combustion of a tangentially coal-fired boiler[J]. Energy Sources Part a-Recovery Utilization and Environmental Effects, 2022, 44(1): 1854-1863.
- [19] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等.正交试验设计和分析方法研究[J].实验技术与管理,2010,27(9):52-55.
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, et al. Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment[J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27(9): 52-55.
- [20] 李宁,葛家楠,汪健生.300 MW 机组四角切圆煤粉炉空气与富氧燃烧对比模拟研究[J].热力发电,2022,51(6):122-131.
LI Ning, GE Jianan, WANG Jiansheng. Comparative simulation of air and oxygen-enriched combustion in a 300 MW tangentially fired pulverized coal boiler[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(6): 122-131.
- [21] 王涛,周托,吕俊复,等.660 MW 燃煤锅炉屏式过热器壁温特性数值模拟研究[J].煤炭学报,2022,47(11):3860-3869.
WANG Tao, ZHOU Tuo, LÜ Junfu, et al. Numerical simulation research on heat transfer characteristics of platen superheater of 660 MW coal-fired boiler[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(11): 3860-3869.
- [22] ZHU T, NING X, TANG C L, et al. Numerical investigation on combustion and NO_x formation characteristics under deep-staging conditions within a cyclone barrel[J]. Fuel, 2022, 313: 122714.
- [23] TOPOROY D, FORSTER M, KNEER R. Burning pulverized coal in CO₂ atmosphere at low oxygen concentrations[J]. Clean Air (USA), 2007, 8(4): 321-338.
- [24] 徐通模.锅炉燃烧设备[M].西安:西安交通大学出版社,1990.